

고성능 AC-DC 변환기를 이용한 저전압 진동에너지 하베스팅 회로

공효상, 한장호, 최진욱, 윤은정, 유종근

인천대학교

A Low-voltage Vibrational Energy Harvesting Circuit using a High-performance AC-DC converter

Hyo-sang Kong, Jang-ho Han, Jin-uk Choi, Eun-jung Yoon, Chong-gun Yu

Incheon National University

E-mail : kettle1991@naver.com

요 약

본 논문에서는 진동 에너지를 이용한 MPPT 제어기능을 갖는 에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. Body-bias technique과 bulk-driven technique을 이용하여 저전압에서도 높은 효율특성을 갖는 고성능 AC-DC 변환기를 제안하고 진동에너지 하베스팅 회로 설계에 적용하였다. MPPT (Maximum Power Point Tracking) 제어는 진동소자의 개방회로전압과 MPP 전압간의 관계를 이용하였으며, 진동소자의 개방회로전압을 주기적으로 샘플링 함으로써 이를 이용해 MPPT 기준전압을 생성하고, 이를 기준으로 부하로의 에너지 공급을 제어한다. 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계된 회로의 칩 면적은 1.21mm \times 0.98mm이다.

ABSTRACT

This paper describes a vibrational energy harvesting circuit with MPPT control. A high-performance AC-DC converter of which the efficiency is improved by using body-bias technique and bulk-driven technique is proposed and applied for the vibrational energy harvesting circuit design. MPPT (Maximum Power Point Tracking) control function is implemented using the linear relationship between the open-circuit voltage of a vibrational device and its MPP voltage. The designed MPPT control circuit traces the maximum power point by periodically sampling the open circuit voltage of a vibrational device, makes the reference voltages using sampled voltage and delivers the maximum available power to load. The proposed circuit is designed with a 0.35 μ m CMOS process, and the chip area is 1.21mm \times 0.98mm.

키워드

Energy harvesting, MPPT, Low-voltage, Vibration energy, Bulk-driven technique

I. 서론

환경 에너지 자원에 대한 연구가 늘어나고 있고, IoT 기술의 발전으로 기기들의 전원공급으로 필요한 에너지를 열과 진동, 빛 등을 이용하여 전기에너지로 변환하는 에너지 하베스팅 기술이 각광 받고 있다. 진동에너지 주로 piezoelectric (PZT) 소자를 이용하여 전기에너지로 변환된다. PZT 소자의 출력 신호는 AC 형태이기 때문에 먼저 DC 신호로 변환하기 위한 AC-DC 변환기가 이 논문은 IDEC 지원에 의해서 일부 수행되었음.

필요하다. 수확된 진동에너지가 부하로 잘 전달 되기 위해서는 AC-DC 변환기의 전력변환효율이 높아야 한다. AC-DC 변환기의 전력효율이 높아야 한다.

최근 AC-DC 변환기로는 4개의 MOS 스위치로 구성된 NVC (Negative Voltage Converter)와 능동 (active) 다이오드로 구성된 능동 구조가 주로 이용되고 있다[1,2]. 또한, 저전압 동작을 위해 body-bias technique을 적용하여 NVC에 사용되는 MOS 트랜지스터 문턱전압을 낮춘 AC-DC 변환기[2]도 보고되고 있다. 그러나 이 회로에서는

간단한 직렬 MOS 트랜지스터 전압분배기를 이용하였기 때문에 수화된 전압 레벨이 변하면 body bias 전압 또한 비례해서 변한다. 따라서 동작 가능한 입력 전압 범위가 제한적일 수밖에 없다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 저전압 기준전압 회로를 이용하여 NVC에 항상 고정된 body bias 전압을 공급하여 효율을 향상시키고, 동작 전압범위도 향상시킨 새로운 AC-DC 변환기를 제안하였다. 또한, 제안된 AC-DC 변환기를 적용한 진동에너지 하베스팅 회로를 0.35um CMOS 공정으로 설계하였다.

II. 회로 설계 및 검증

1. AC-DC Converter

그림 1은 AC-DC 변환기의 블록도이다.

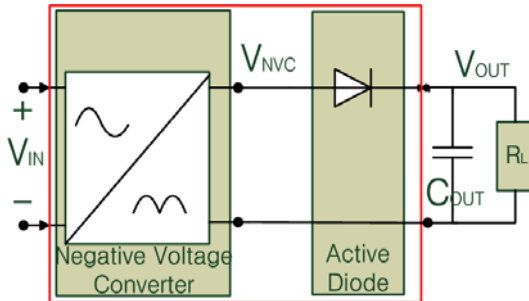


그림 1. AC-DC 변환기의 블록 다이어그램

AC-DC 변환기는 두 개의 단으로 NVC와 Active Diode로 구성된다. 첫 번째 단인 V_{NVC}는 입력 교류전압의 음의 영역을 양의 영역으로 바꾸는 역할을 한다. 그러나 NVC만으로는 전류 방향이 제어되지 않기 때문에 역전류에 의해 Load Capacitor의 전하를 유지시킬 수 없다는 문제점이 있다. 따라서 두 번째 단인 Active Diode가 필요로 하다.

1.1 Negative Voltage Converter

본 논문에서 제안된 NVC의 회로도들 그림 2에 보였다. PMOS의 body 단자에 전압을 인가하여 문턱전압을 낮춰 낮은 전압에서도 MOSFET이 동작하게 할 수 있는 기술인 body bias technique을 사용하여 낮은 전압에서도 전파정류 동작을 할 수 있도록 설계하였다.

그림 3은 NVC의 PMOS의 drain 단자와 body 단자 사이에 걸리는 전압에 따른 효율을 측정된 결과이다. V_{BB} 값이 증가하면 POMS 스위치의 문턱전압이 감소해서 낮은 입력 전압에서도 효율이 증가하는 것을 알 수 있다, 그러나 V_{BB}가 body diode에 On 될 정도로 커지면 (ex: V_{BB}=0.8V) body diode에서의 누설전류를 인해 효율이 다시 감소하게 된다. 이 논문에서는 V_{BB} 전압을 400mV로 정하였다. 이는 칩 설계 과정과

실제 만들어진 칩과의 마진을 두기 위해서이다.

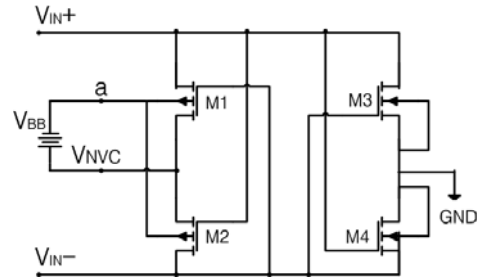


그림 2. 제안된 NVC 회로

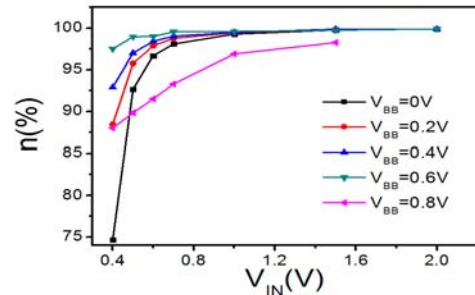


그림 3. V_{BB} 전압에 따른 NVC 효율 특성

전압 전원 V_{BB}를 구현하기 위해 기존 논문 [2]에서는 MOS 트랜지스터를 직렬로 연결한 간단한 전압 분배기를 이용하였다. 그러나 이 경우에는 입력 전압이 변하면 V_{BB} 전압이 변하게 되어, 입력 전압 범위가 제한될 뿐만 아니라 효율까지 떨어질 수 있게 된다. 본 논문에서는 이를 개선하기 위해 beta multiplier 회로를 이용하여 입력 전압이 바뀌어도 고정된 V_{BB} 전압을 인가할 수 있도록 하였다. 그림 4는 설계된 beta multiplier 회로이다.

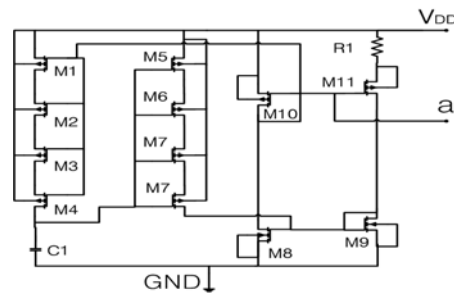


그림 4. Beta multiplier 회로

그림 5는 NVC의 출력에 V_{DD}에 연결한 경우 (즉, V_{DD}=V_{NVC}), 설계된 NVC의 효율과 기존 논문 [2]의 효율을 비교한 그래프이다. 입력 전압이 커질수록 효율의 차이가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 6에서 보듯이 입력 전압이 커질수록 body에 인가되는 전압 V_{BB}가 커지고, 그 결과 body diode에서의 누설전류 I_{leak} 또한 급격히 증가하게 되어 전체적인 효율이 크게 감소되는 것을 확인할 수 있다. 반면 본 논문에서 제안된

NVC의 경우 전압이 높아져도 body bias 전압이 거의 일정하다는 것을 확인할 수 있다.

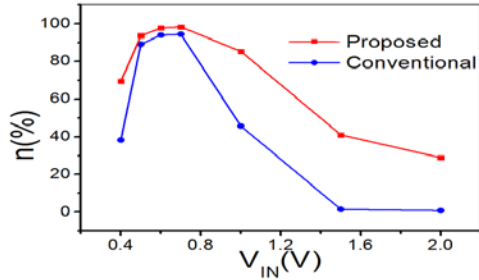


그림 5. NVC의 효율 비교 ($V_{DD}=V_{NVC}$)

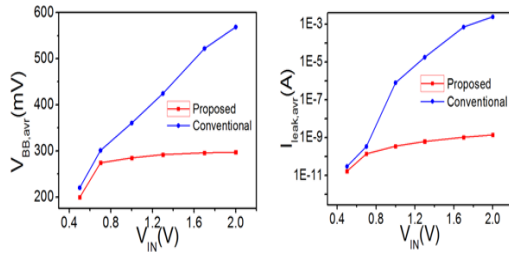


그림 6. 입력 전압에 따른 V_{BB} 와 I_{leak} 의 평균값 ($V_{DD}=V_{NVC}$)

그림 7은 AC-DC 변환기의 출력 직류전압 V_{OUT} 을 beta multiplier의 V_{DD} 에 연결한 경우 (즉, $V_{DD}=V_{OUT}$)의 효율 비교 그래프이다. 앞의 경우와 마찬가지로 이 경우에도 기존 회로의 경우, 입력 전압이 증가하면 그림 8에서와 같이 V_{BB} 와 I_{leak} 가 증가하여 효율이 크게 감소한다.

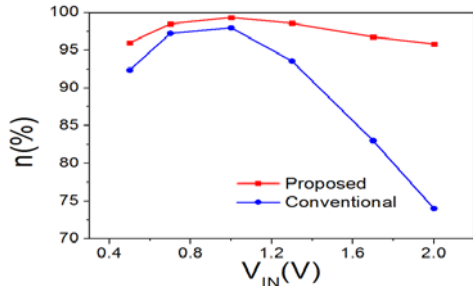


그림 7. NVC의 효율 비교 ($V_{DD}=V_{OUT}$)

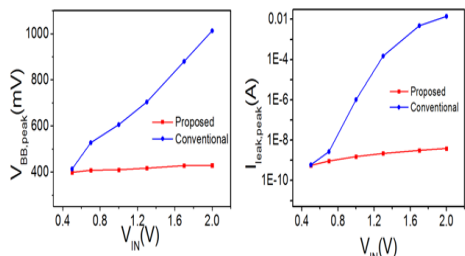


그림 8. 입력 전압에 따른 V_{BB} 와 I_{leak} 의 Peak값 ($V_{DD}=V_{OUT}$)

제안된 NVC의 경우는 beta multiplier가 body

bias 전압을 일정하게 인가하는 것을 확인할 수 있고, 그에 따라 누설전류 또한 거의 일정하다는 것을 볼 수 있다.

1.2 Active Diode

Active diode는 PMOS 스위치인 MPS와 comparator로 구성되어 있다. 그리고 active diode의 안정된 동작 시작을 보장하기 위해 PMOS diode인 MPBD를 병렬로 사용하였다. 또한, 누설전류와 latch-up 현상을 방지하기 위해 bulk regulation(BR)을 사용하였다. 저전압에서도 동작 가능하도록 하기 위해 bulk-driven technique을 이용한 비교기의 구조를 그림 10에 나타내었다.

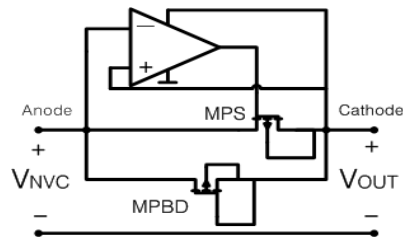


그림 9. Active diode

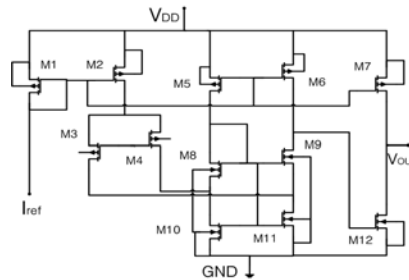


그림 10. 비교기 회로

제안된 NVC와 active diode를 연결하여 AC-DC 변환기 전체 회로의 효율 특성을 검증하였다. C_{OUT} 이 100nF 일 때 부하저항 R_L 에 따른 효율 특성은 그림 11에 보였다. 설계된 AC-DC 변환기의 최대 효율은 R_L 이 170KΩ 일 때 98.9%이다.

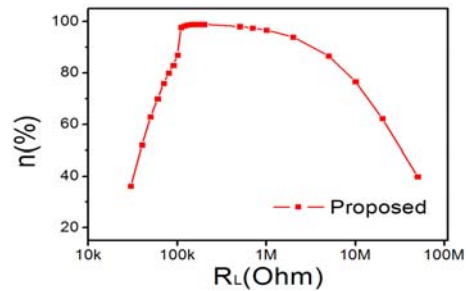


그림 11. 설계된 AC-DC 변환기의 효율 특성

2. Vibrational Energy Harvesting Circuit

설계된 AC-DC 변환기를 이용하여 MPPT 제어 기능을 갖는 진동에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. 설계된 회로의 블록 다이어그램을 그림 12에 보였다.

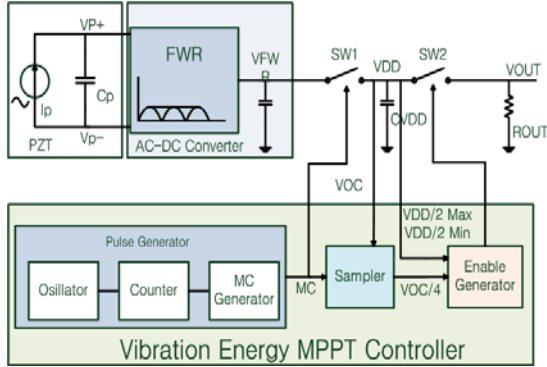


그림 12. 설계된 진동에너지 하베스팅 회로의 블록 다이어그램

MPPT 회로는 압전소자를 통해 얻은 진동에너지가 최대 전력을 유지하면서 부하에 전달되도록 하는 역할을 한다. 이때 MPPT controller의 모든 회로는 최소 0.7V의 공급 전원에서 동작하도록 설계되었다. 주기적으로 진동 소자의 개방 회로 전압인 V_{OC} 를 sampling 하기 위한 MC 신호를 발생하는 pulse generator, 최종적으로 $V_{OC}/4$ 를 출력하는 sampler, 그리고 마지막으로 부하에 연결된 스위치 sw2의 On/Off 상태를 결정하는 enable generator로 구성되어 있다.

그림 13에 설계된 진동에너지 하베스팅 회로의 모의실험 결과를 보였다. V_{OC} 가 sampling 되는 것과 부하에 전압이 전달되는 것을 볼 수 있다. V_{OC} 가 2초에 한 번씩 Sampling이 되어 1.4V 까지 올라갔다가 다시 MPPT 회로가 동작하여 0.7V 부근에서 전압이 출력된다. 또한 Enable 신호를 받아 출력단의 PMOS 스위치의 On/Off를 조절함으로써 부하에 전압이 전달되는 것을 확인할 수 있다.

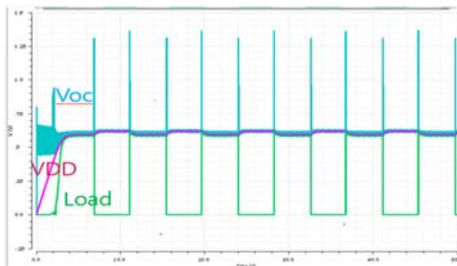


그림 13. 설계된 진동에너지 하베스팅 회로의 모의실험 파형

그림 14는 제안 된 회로의 레이아웃으로 크기는 패드를 포함하여 1.21mm×0.98mm이다.

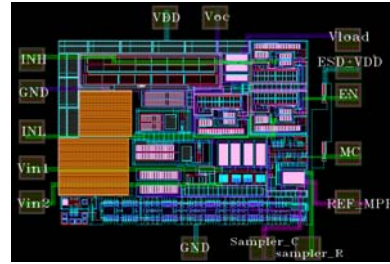


그림 14. 레이아웃 도면

III. 결론

본 논문에서는 beta multiplier 구조의 간단한 저전압 기준전압 회로를 이용하여 NVC에 항상 고정된 body bias 전압을 공급하여 효율과 동작 전압 범위를 향상시킨 새로운 AC-DC 변환기를 제안하였다. 제안된 AC-DC 변환기의 최대 효율은 98.9%이다. 설계된 AC-DC 변환기를 적용하여 MPPT 제어기능을 갖는 진동에너지 하베스팅 회로를 설계하고 동작을 검증하였다. 본 논문에서 제안된 AC-DC 변환기는 저전압 동작이 요구되는 다양한 진동에너지 하베스팅 시스템에 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] A. S. Herbawi, et al, "An Ultra-Low-Power Active AC-DC CMOS Converter For Sub-1V Integrated Energy Harvesting Applications," *IEEE Sensors*, pp.1-4, 2013.
- [2] Z. Yang, et al, "A highly efficient interface circuit for ultra-low-voltage energy harvesting," *IEICE Electronics Express*, vol.10, No.24, pp.1-6, 2013.